МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИАП РАН

ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А, Санкт-Петербург, 198095, а/я 140, тел.: (812) 363-07-19, факс: (812) 363-07-20
ОКПО 04699534, ОГРН 1027810289980, ИНН 7809003600, КПП 780501001, e-mail: iap@ianin.spb.su, www.iairas.ru

12.11.2026 № 10341-400/101

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Врио директора ИАП РАН
Кандидат технических наук

_____ Д.А. Белов

«12» ноября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт аналитического приборостроения Российской академии наук» (ИАП РАН)

Диссертационная работа Пичахчи Степана Витальевича «Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики», выполнена в Институте аналитического приборостроения Российской академии наук и Академическом университете им. Ж.И. Алферова.

Научный руководитель — Голубок Александр Олегович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии ИАП РАН.

Пичахчи Степан Витальевич в 2022 году окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Транспортные средства специального назначения». В период с 2022 по 2026 год С.В. Пичахчи проходил обучение в очной аспирантуре Академического университета им. Ж.И. Алферова по направлению 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Во время подготовки диссертации работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук в лаборатории сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии в должности младшего научного сотрудника.

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Структура диссертации включает следующие разделы:
введение, обзор литературы (глава 1), исследование инерциального шагового пьезоэлектрического привода (глава 2), разработка системы сканирования с динамическим демпфированием колебаний (глава 3), разработка алгоритмов повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии и экспериментальная реализация аппаратно-программных средств (главы 4 и 5), заключение.

Цель и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является исследование физических и алгоритмических закономерностей, определяющих быстродействие метода СЗМ, и создание аппаратно-программных средств, обеспечивающих уменьшение времени получения СИПМ-изображения, при сохранении ключевых характеристик метода — пространственного разрешения, чувствительности, воспроизводимости и неинвазивности по отношению к исследуемым биологическим объектам.

Для достижения поставленной цели в работе решены **задачи** анализа современного состояния аппаратно-программных средств СЗМ; моделирования и экспериментального исследования системы сближения зонда с образцом на базе пьезоинерциального привода; моделирования и совершенствования системы сканирования; исследования пьезорезонансного камертонного датчика; разработки адаптивного алгоритма hopping-моды СИПМ и алгоритма с аппаратным прерыванием; аппаратной реализации разработанных подходов; их апробации на эталонных и биологических образцах; анализа и интерпретации полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Балансировка конструкции пьезосканера с двумя разнонаправленными упругими мембранами с учетом как активного смещения материала пьезоактюатора под действием обратного пьезоэффекта, так и пассивного смещения материала несущего корпуса, возникающего в результате упругих деформаций, позволяет в 7 раз уменьшить амплитуду резонансного пика по сравнению с разбалансированной конструкцией.
2. В инерциальном линейном шаговом двигателе с пьезоактюатором, работающем по механизму «проскальзывание-залипание», необходимо обеспечить оптимальное значение потерь в колебательной системе путем подбора электрического сопротивления в цепи разряда пьезоактюатора, при которых, с одной стороны, демпфируются колебания, дестабилизирующие работу двигателя, а, с другой стороны, ускорение стержня в момент разряда пьезопакета достаточно для возникновения фазы «проскальзывание».
3. Аппаратное прерывание сканирования по пороговому значению тока и совместное использование двух пороговых детекторов и пикового детектора улучшает быстродействие сканирующего ион-проводящего микроскопа по сравнению с использованием непрерывного регулятора, и позволяет за один цикл подвода нанопипетки регистрировать топографию поверхности, угол наклон спадающей ветви кривой подвода I(Z) и максимальное значение ионного тока.

Основные научно-теоретические результаты работы:

1. Разработана и экспериментально исследована система грубого сближения зонда с образцом на основе вертикального инерциального пьезоэлектрического привода. Установлено оптимальное значение сопротивления в цепи разряда пьезопакета, обеспечивающее подавление паразитных электропьезомеханических колебаний при сохранении достаточной скорости разрядки и максимальной величины шага.

2. Разработана конечно-элементная модель сбалансированного пьезосканера. Установлено влияние деформации корпуса и смещения центра масс конструкции на низкочастотный резонанс; предложено центральное крепление пьезопакета между двумя упругими мембранами, обеспечивающее эффективное динамическое демпфирование колебаний.

3. Разработаны и экспериментально верифицированы аппаратно-программные средства повышения быстродействия СИПМ: адаптивный hopping-алгоритм с уменьшением высоты отвода нанопипетки, алгоритм сканирования с аппаратным прерыванием по пороговому значению тока, а также схемы параллельной регистрации параметров кривой подвода.

4. Разработана и оптимизирована конструкция пьезорезонансного камертонного датчика с вольфрамовым зондом; показано, что работа на второй колебательной моде повышает максимальную скорость сканирования при сохранении качества ССМ-изображений.

5. Разработана экспериментальная аппаратная платформа на базе микроконтроллера RP2350, включающая 16-разрядные АЦП и ЦАП, высоковольтные усилители, преобразователи ток-напряжение, пороговые и пиковые детекторы, схемы выборки-хранения, аналоговой обратной связи и коммутации.

Основные практические и научно-технические результаты работы:

1. Предложенное балансирование пьезосканера обеспечивает четырехкратное увеличение скорости сканирования в hopping-моде СИПМ и в режиме сканирующей силовой микроскопии по сравнению с разбалансированной конфигурацией.

2. Адаптивный алгоритм hopping-моды уменьшает время получения изображения размером 10×10 мкм² с разрешением 100×100 точек с 23 мин 36 с до 6 мин 18 с при сохранении качества топографии и неинвазивности измерений.

3. Алгоритм с аппаратным прерыванием позволил достичь скорости сканирования твердых образцов до 200 точек/с при высоте отвода 50 нм; при исследовании нейрональных клеток с перепадом высот до 10 мкм достигнута скорость около 15 точек/с.

4. Модернизация преобразователя ток-напряжение сократила время отклика на ступенчатое воздействие с 200 до 75 мкс и повысила потенциальную скорость сканирования до 30 точек/с при высоте отвода нанопипетки 500 нм.

5. Разработанные технические решения апробированы на калибровочных мерах, полимерных слепках и фиксированных нейрональных клетках; подтверждены их эффективность и надежность.

Научная новизна:

1. Для исследованного пьезоинерционного привода установлена зависимость средней величины шага от сопротивления в цепи разряда пьезопакета; показано наличие области повышенной величины шага.

2. Показано влияние деформации корпуса пьезосканера на эффективность балансировки и подавления первого резонансного пика; предложена конфигурация крепления, учитывающая эту деформацию.

3. Для реализованной системы СИПМ предложен алгоритм уменьшения высоты отвода нанопипетки; на тестовом образце показано сокращение времени получения кадра по сравнению с полным отводом.

4. Реализована схема регистрации двух пороговых координат и максимального тока за один цикл подвода нанопипетки, обеспечивающая получение дополнительных каналов без отдельного измерительного цикла.

5. Для исследованного пьезорезонансного камертонного датчика показана возможность работы на второй моде при большей скорости силового сканирования тестового образца.

Практическая значимость:

1. Цифровые модели линейного инерциального двигателя с актюатором на основе пьезопакета, сбалансированного пьезосканера и пьезорезонансного силового зондового датчика камертонного типа могут быть использованы при расчетах параметров и проектировании модулей сканирующих зондовых микроскопов.

2. Аппаратно-программные средства, апробированные на тестовых объектах, включая линейный инерциальный двигатель с пьезоактюатором, пьезосканер с балансом центра масс, пьезорезонансный силовой зондовый датчик, электронный контроллер на базе микроконтроллера RP2350 с набором специализированных модулей, алгоритмы, сокращающие время измерений, могут стать основой для создания сканирующих зондовых микроскопов нового поколения, в том числе ион-проводящих микроскопов с повышенным быстродействием.

3. Пьезорезонансный силовой зондовый датчик камертонного типа с зондом в виде стеклянной нанопипетки может заменить сложный в изготовлении и дорогостоящий кремниевый кантилевер FluidAFM, что послужит развитию методики ион-проводящей микроскопии в интересах микробиологии и клеточной медицины.

Соответствие паспорту специальности:

Полученные в диссертационной работе С.В. Пичахчи «Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии» научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» (область науки — технические науки), в частности направлениям, связанным с изучением физических явлений и процессов для создания новых приборов и методов экспериментальной физики, разработкой новых принципов и методов измерений физических величин, разработкой и созданием научной аппаратуры, приборов и экспериментальных установок для проведения исследований в различных областях физики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ СЕМИНАРА

Диссертационная работа Пичахчи Степана Витальевича «Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии» полностью соответствует критериям, определенным пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (с учетом изменений и дополнений), и паспорту научной специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» (область знаний — технические науки).

Заключение подготовлено на заседании объединенного научного семинара ИАП РАН с участием сотрудников профильных подразделений института (протокол № 12 от «16» октября 2026 г.).

Диссертационная работа Пичахчи Степана Витальевича «Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» рекомендуется к защите в диссертационном совете 24.1.029.01 на базе ИАП РАН.

Председатель семинара
Доктор ф.-м.н., Главный научный сотрудник ИАП РАН — Явор М.И.

Секретарь
Доктор ф.-м.н., Ведущий научный сотрудник ИАП РАН — Буляница А.Л.

Подписи гл. науч. сотрудника Явора М.И.
и вед. науч. сотрудника Буляницы А.Л.
удостоверяю
Зав-к отд. Лисс Иванова